Verschilversterkers

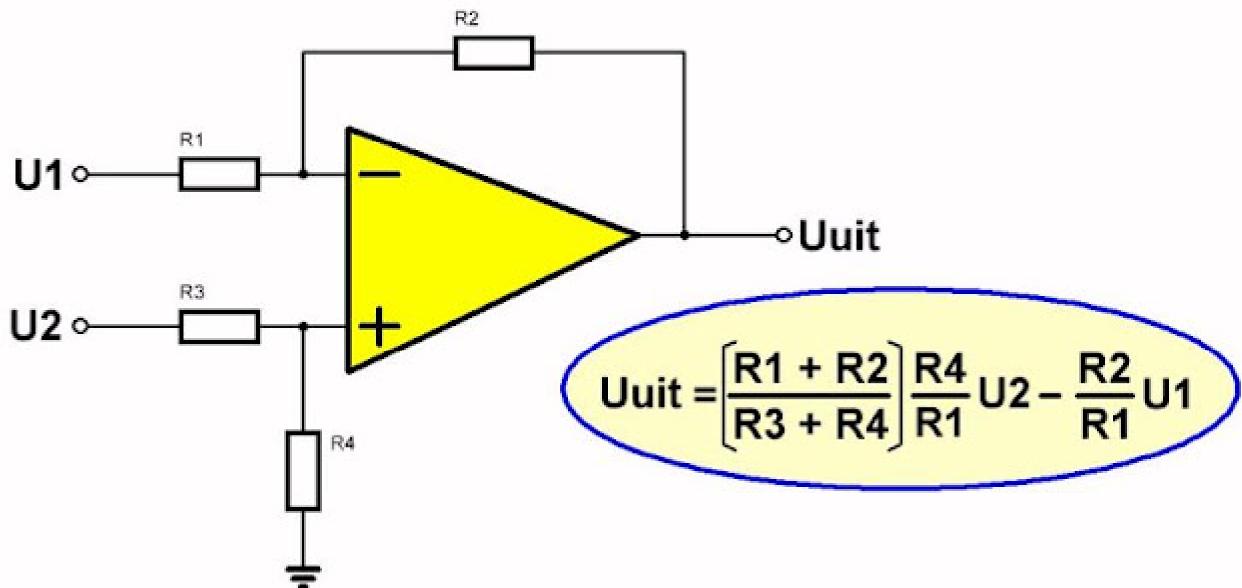
De verschilversterker is een typische meet- en regelschakeling. Het is een schakeling die het verschil tussen twee spanningen berekent en, al dan niet versterkt, op de uitgang zet. Een speciale uitvoering is de instrumentatie-versterker, die vaak in de professionele elektronica wordt toegepast.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 20-06-2019

Kennismaking met de verschilversterker

A - B = C
Omdat een verschilversterker het verschil berekent tussen de spanningen op twee ingangen heeft een dergelijke schakeling per definitie twee verschillende ingangen waarop u de twee van elkaar af te trekken spanningen aanlegt. Staat op de ene ingang een spanning van +5 V en op de tweede ingang een spanning van +3 V, dan zal op de uitgang een spanning van +2 V verschijnen. Een verschilversterker werkt algebraïsch, dat wil zeggen dat de schakeling rekening houdt met de wiskundige tekenregels voor aftrekken.
Verschilversterkers werken in de meeste gevallen met gelijkspanningen en er doen zich dus geen problemen voor met de frequentiecompensatie of met het optimaliseren van de doorlaatband. Problemen als offset spelen echter wél een grote rol, omdat aan de nauwkeurigheid van de schakeling zeer hoge eisen worden gesteld.

Basisschakeling van een verschilversterker
De basisschakeling van een verschilversterker is getekend in de onderstaande figuur. In principe kunt u zo'n schakeling met transistoren opbouwen, maar de noodzakelijke schakeling zit in iedere op-amp, dus het gebruik van zo'n onderdeel ligt voor de hand. De twee ingangsspanningen gaan via de weerstanden R1 en R3 naar de twee ingangen van een operationele versterker. De niet-inverterende ingang gaat via een weerstand R4 naar de massa, de inverterende ingang is via een weerstand R2 teruggekoppeld naar de uitgang van de op-amp. De schakeling berekent het spanningsverschil tussen de spanning op de niet-inverterende ingang en de spanning op de inverterende ingang. Hoe die berekening precies verloopt hangt af van de onderlinge verhouding van de vier weerstanden. De algemene formule die het verband geeft tussen de uitgangsspanning en de ingangsspanningen staat in de tekstballon onder het basisschema.



Het basisschema van een verschilversterker met een op-amp. (© 2019 Jos Verstraten)

Dat is een tamelijk ingewikkelde formule. In de praktijk wordt in de meeste gevallen aan de vier weerstanden niet zomaar een willekeurige waarde geven. Als u bijvoorbeeld alle vier de weerstanden aan elkaar gelijk maakt herleidt de formule zich tot de zeer eenvoudige uitdrukking:

$U_{uit} = U_2 - U_1$

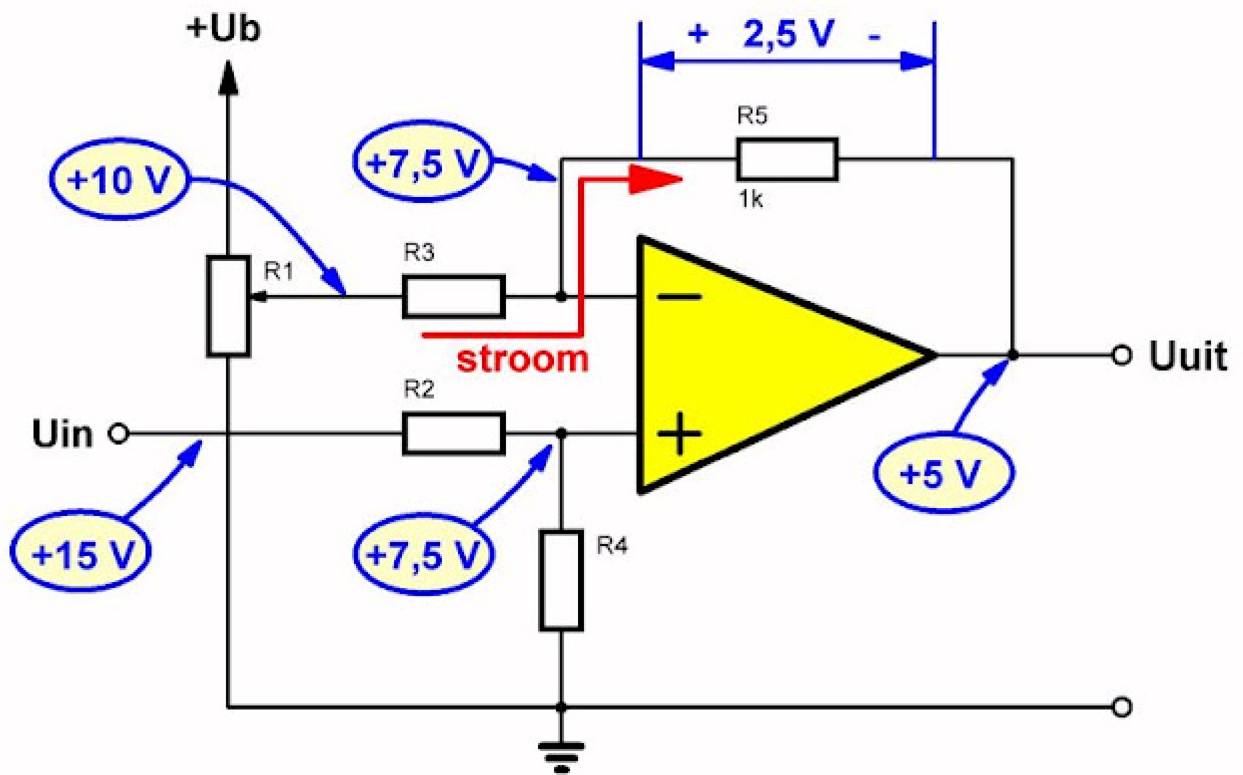
Kiest u R1 = R3 en R2 = R4, dan wordt de formule:

$U_{uit} = [R2 / R1] \bullet [U_2 - U_1]$

Met deze laatste configuratie kunt u dus het spanningsverschil tussen de beide ingangen versterkt aan de uitgang laten verschijnen.

De werking van de schakeling

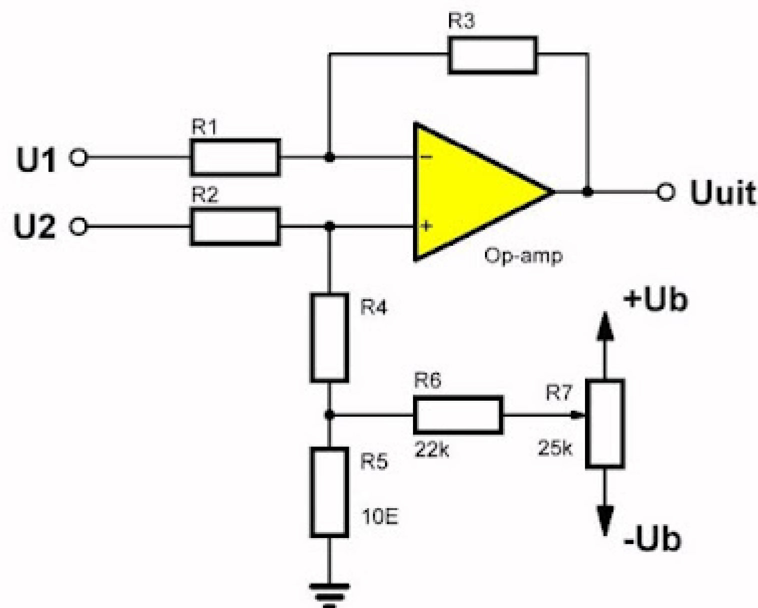
De werking van de verschilversterker wordt toegelicht aan de hand van een voorbeeldje voorgesteld in de onderstaande figuur. Aan de niet-inverterende ingang wordt een spanning van +15 V gelegd. De inverterende ingang wordt via R1 aangesloten op een spanning van +10 V. De vier bepalende weerstanden van de schakeling, R2 tot en met R5, zijn aan elkaar gelijk. Als de theorie klopt, dan zou op de uitgang een spanning van +5 V moeten verschijnen.



Aan de hand van dit praktische voorbeeld wordt de werking van de verschilversterker verklaard. (© 2019 Jos Verstraten)

De spanning van +15 V staat over de spanningsdeler R2/R4. De weerstand R4 ligt immers aan de massa. Omdat beide weerstanden even groot zijn zal op hun knooppunt een spanning staan van +7,5 V. De operationele versterker streeft naar spanningsgelijkheid op beide ingangen en stelt zijn uitgangsspanning dusdanig is dat ook op de inverterende ingang een spanning van +7,5 V staat.
Over de weerstand R3 staat bijgevolg een spanning van 2,5 V. Links staat immers +10 V, rechts +7,5 V. Als gevolg van deze spanningsval zal er door deze weerstand een stroom gaan vloeien. Omdat de impedantie van de inverterende ingang zeer hoog is kan deze stroom alleen maar via de weerstand R5 afvloeien naar de uitgang van de op-amp. De weerstanden R3 en R5, even groot, worden doorlopen door dezelfde stroom. Het gevolg is dat ook de spanningsvallen over beide weerstanden identiek zijn. Over de weerstand R5 valt dus ook een spanning van 2,5 V met de getekende polariteit. U kunt nu de spanning op de uitgang van de operationele versterker berekenen. De linker aansluiting van weerstand R5 staat op een spanning van +7,5 V. Over de weerstand zélf valt een spanning van 2,5 V. Beide spanningen staan in serie geschakeld, maar met tegengestelde polariteit, zodat de spanning op de rechter aansluiting van deze weerstand gelijk is aan +7,5 V - 2,5 V = +5 V.
Hetgeen bewezen moest worden!

De offsetcompensatie bij de verschilversterker
In de onderstaande figuur is het standaard schema getekend voor de externe offsetcompensatie van een verschilversterker. Er wordt gecompenseerd door de weerstand die van de niet-inverterende ingang naar de massa gaat te splitsen in twee deelweerstanden R4 en R5. R5 is zeer klein (10 Ω) en kan verwaarloosd worden bij het berekenen van de verschilspanning op de uitgang. Er wordt een kleine compensatiestroom door deze weerstand gestuurd, die wordt opgewekt door de loperspanning van de potentiometer R7 via de serieweerstand R6 naar het knooppunt van R4 en R5 te voeren.



De offsetcompensatie bij een verschilversterker. (© 2019 Jos Verstraten)

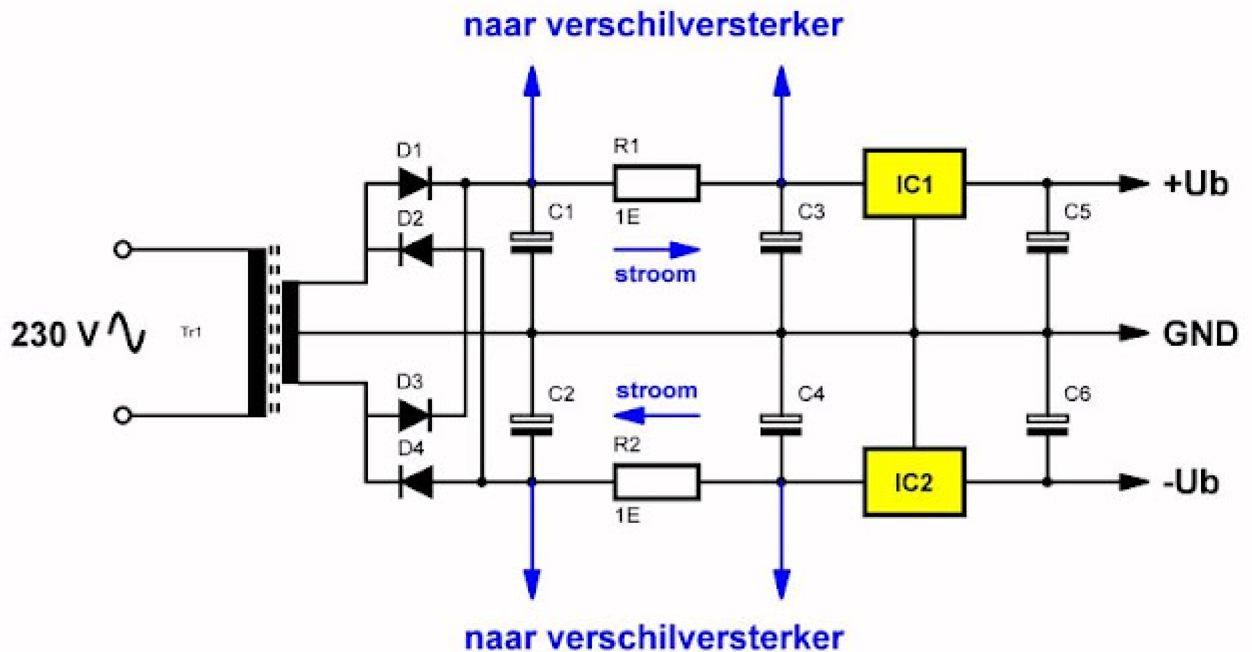
Toepassingen van de verschilversterker

Inleiding
Een verschilversterker wordt in de meet- en regeltechniek gebruikt voor het berekenen van het spanningsverschil tussen twee spanningen. Enige voorbeelden van deze toepassing:

- Het berekenen van de spanningsval over een weerstand die ergens in een verbinding zit, bijvoorbeeld voor het meten van de stroom die een voeding levert.
- Het compenseren van de offsetspanning van een temperatuursensor.
- Het meten van de brugspanning van een brug van Wheatstone.
- Het automatisch aanpassen van het meetbereik van een meter door het aftrekken van een einde-schaal spanning.
- Het onderdrukken van common-mode signalen. Als dusdanig wordt een verschilversterker in de audiotechniek toegepast, bijvoorbeeld voor het afsluiten van een zwevende microfoon die niet rechtstreeks met de massa verbonden is.

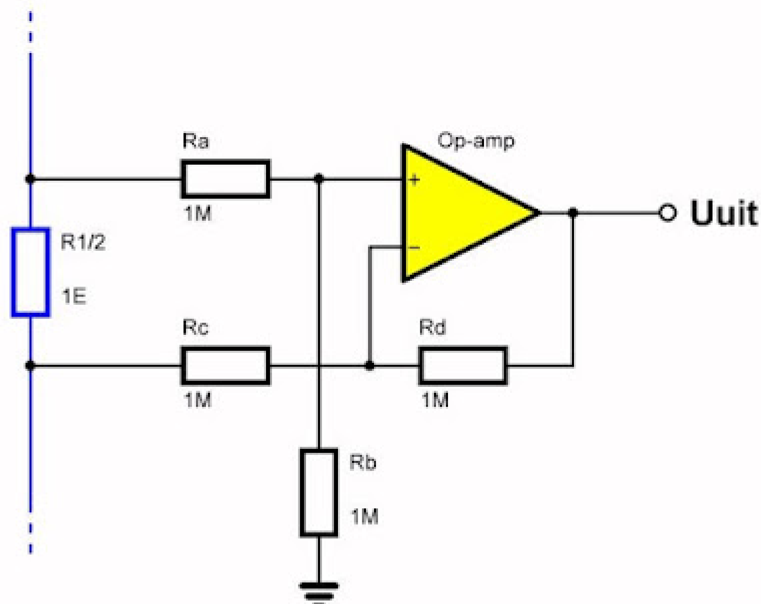
In de volgende paragrafen worden deze toepassingen toegelicht.

Het meten van een voedingsstroom
In de onderstaande figuur is een standaard symmetrische voeding getekend. Voor bepaalde toepassingen kan het belangrijk zijn te weten hoeveel stroom de voeding verbruikt. U kunt natuurlijk een analoge ampèremeters in de uitgangsleidingen van de voedingen opnemen. Maar tegenwoordig moet alles digitaal en dus moet u de stroom op een digitale meter meten. Digitale meters meten echter spanningen en bijgevolg moet u de geleverde stroom op de een of andere manier omzetten in een spanning die evenredig is met de stroom.



Een standaard voeding waarbij kleine sensorweerstanden worden gebruikt voor het digitaal meten van de geleverde stroom. (© 2019 Jos Verstraten)

In de twee voedingsleidingen worden kleine sensorweerstanden R1 en R2 opgenomen. De stromen die van de voedingen worden afgenomen vloeien door deze weerstanden en wekken er kleine spanningen over op. Als u weerstanden van 1 Ω toepast zal een geleverde stroom van 1 A een spanning van 1 V genereren. De spanning over de weerstanden is dus recht evenredig met de geleverde stroom. Maar ten opzichte van de massa staan er aan weerszijden van de weerstand natuurlijk volstrekt onbekende en tamelijk willekeurige spanningen. Deze spanningen zijn dus niet zonder meer geschikt om gemeten te worden. De oplossing is beide aansluitingen van de weerstand aan een verschilversterker te leggen, zoals getekend in de onderstaande figuur.



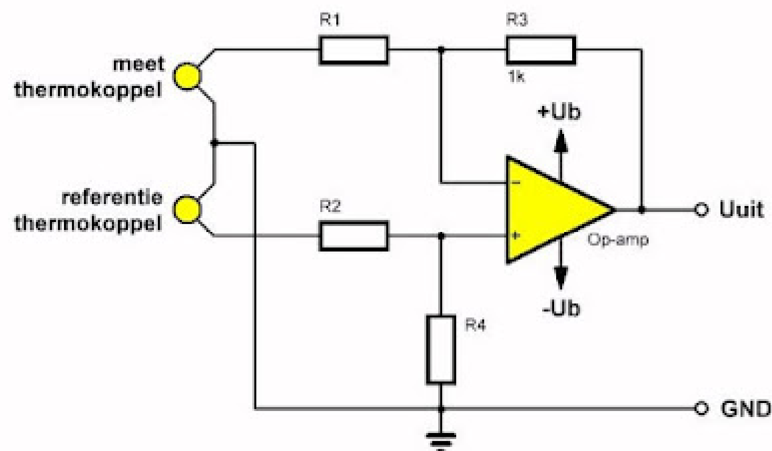
De spanningsval over een sensorweerstand wordt omgezet in een verschilspanning. (© 2019 Jos Verstraten)

Omdat alle vier de weerstanden van de verschilversterker even groot zijn, zal de schakeling het spanningsverschil berekenen tussen beide ingangen. Dat spanningsverschil is nu net de spanning die door de te meten stroom wordt opgewekt over de sensorweerstand. Het gevolg is dat als er 1 A stroom wordt geleverd op de uitgang van de verschilversterker een spanning van 1 V staat ten opzichte van de massa. Deze spanning kunt u meten met een digitale

voltmeter, de meter wijst de door de voeding afgegeven stroom aan.

Opmerkingen
Bij dit schema moeten enige belangrijke kanttekeningen geplaatst worden. Zoals gezegd staan de sensorweerstanden in de lijnen geschakeld die de afgevlakte voedingsspanningen aanbieden aan de stabilisatoren. Bij voedingen met een hoge uitgangsspanning zou de spanning aan een van de aansluitingen van de sensorweerstanden ten opzichte van de massa wel eens 40 V kunnen bedragen. Dat betekent dat de verschilversterker wordt gestuurd met twee signalen die bijvoorbeeld +40 V en +40,8 V groot zijn. Deze spanningen worden weliswaar eerst door twee gedeeld alvorens zij op de ingangen van de op-amp terecht komen. Maar er staan dan toch nog spanningen van ongeveer +20 V op de ingangen van de op-amp. Een normale op-amp, op een normale manier gevoed, kan dergelijke grote spanningen niet verwerken!
U moet dan eerst laag-ohmige spanningsdelers toepassen die de spanningen aan beide aansluitingen van de sensorweerstand reduceren tot bijvoorbeeld +10 V en +10,2 V. Nadien gaan de knooppunten van deze weerstandsdelers naar de ingangen van de hoog-ohmig uitgevoerde verschilversterker. Door de verschilversterker een spanningsversterking van 4 te geven wordt de invloed van de spanningsdelers op het meetresultaat weer gecompenseerd.

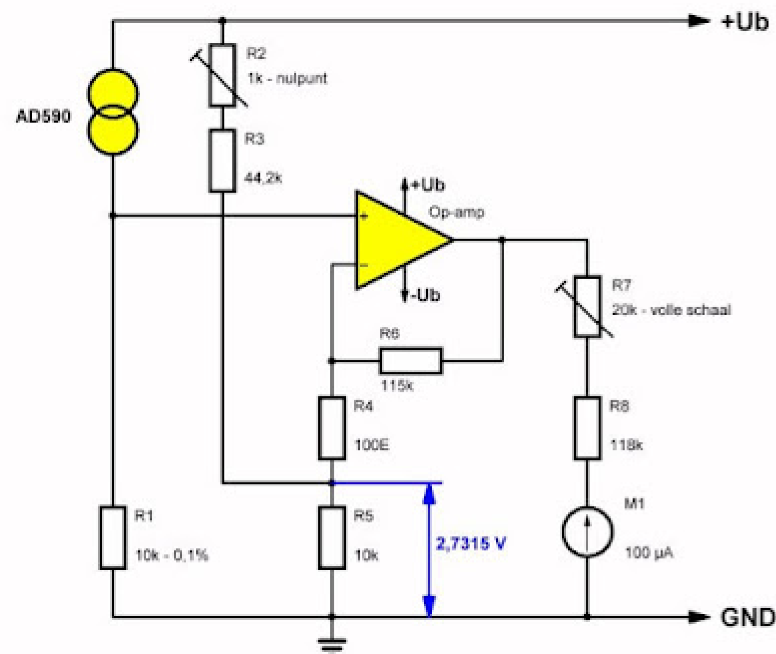
De verschilversterker en thermokoppels
Bij het meten van temperaturen met een thermokoppel moet u steeds een referentie-koppel in serie schakelen voor de zogenaamde *'koude-las compensatie'*. Een verschilversterker is dan de aangewezen schakeling om deze compensatie elektronisch te verwerken. Een praktisch bruikbaar schema is gegeven in de onderstaande figuur. Het knooppunt van beide sensoren gaat naar de massa. Het thermokoppel dat de temperatuur meet gaat naar de inverterende ingang van de verschilversterker. Het referentiekoppel, op kamertemperatuur, wordt aangesloten op de niet-inverterende ingang van de schakeling. De verschilversterker berekent het verschil tussen beide thermokoppel spanningen en levert op de uitgang een spanning die recht evenredig is met de temperatuur in °C.



Het meten van een temperatuur met thermokoppels vereist een verschilversterker.
(© 2019 Jos Verstraten)

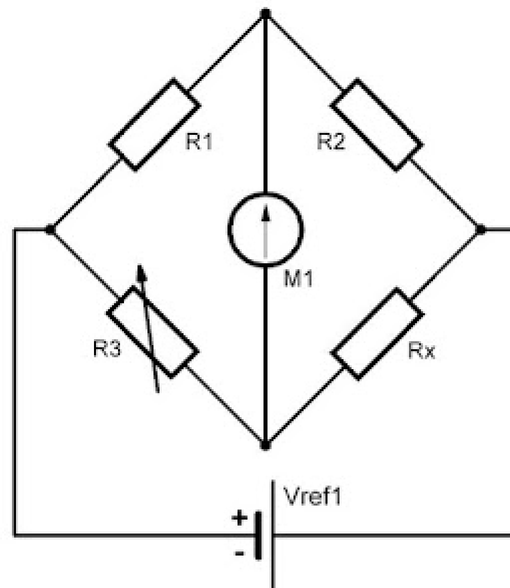
De verschilversterker en PTAT-sensoren
PTAT-sensoren leveren een uitgangsspanning af die recht evenredig is met de absolute temperatuur in graden Kelvin (°K). Een standaard sensor heeft een uitgangsspanning van 10 mV/°K. Dat betekent dat een dergelijke sensor bij 0 °C een spanning genereert van 2,73 V en bij 20 °C een spanning opwekt van 2,93 V. Wilt u een dergelijke sensor gebruiken om een in °C geijkte thermometer te maken, dan moet u deze offsetspanning van 2,73 V van de sensorspanning aftrekken. Dan levert de schakeling immers bij 0 °C een spanning af van 0 V en bij 20 °C een spanning af van 0,2 V. In de onderstaande figuur is een geschikte schakeling getekend. De PTAT-sensor AD590 staat in serie met een weerstand R1 tussen de massa en de voeding geschakeld. Over de serieweerstand wordt de spanning opgewekt die evenredig is met de absolute temperatuur.
Deze spanning gaat naar de niet-inverterende ingang van de operationele versterker. De

inverterende ingang is aangesloten op een referentiespanning van precies 2,7315 V. Dat is de spanning die ook op de niet-inverterende ingang staat bij 0 °C. Door de verschilversterker wordt deze spanning van de sensorspanning afgetrokken, zodat de schakeling bij 0 °C een uitgangsspanning van 0 V opwekt. U kunt de uitgangsspanning, zoals in het voorbeeld, analoog meten maar u kunt deze ook aan een digitale spanningsmeter aanbieden.
Bij dit voorbeeld wordt, voor de eenvoud, de referentiespanning afgeleid van de positieve voedingsspanning. Deze moet dus heel goed zijn gestabiliseerd!



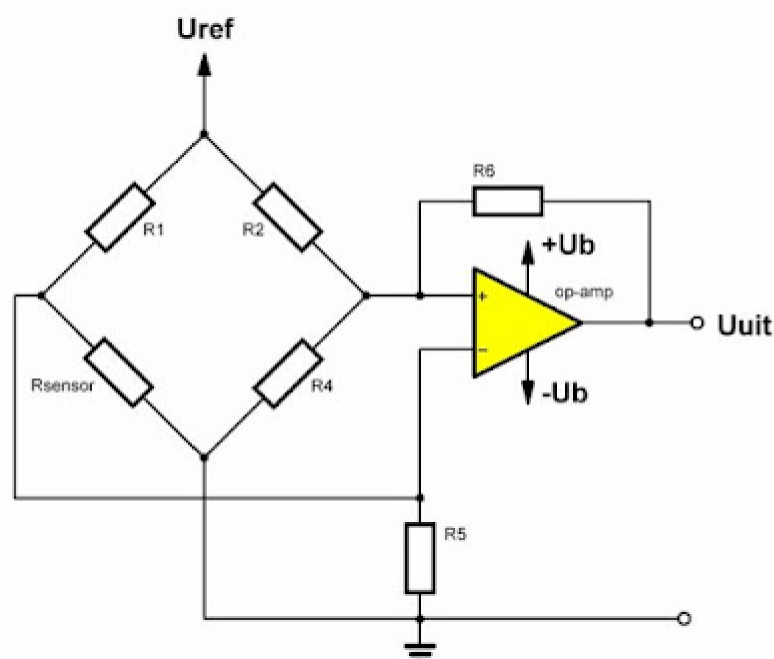
Het compenseren van de PTAT-spanning bij 0 °C door middel van een (aangepaste) verschilversterker. (© 2019 Jos Verstraten)

De verschilversterker en brugschakelingen
Brugschakelingen zijn een belangrijk hulpmiddel voor het nauwkeurig meten van kleine weerstandsvariaties. Charles Wheatstone was de eerste techneut die in 1843 een dergelijke schakeling bedacht en vandaar dat dit soort schakelingen door het leven gaat onder de naam *'Wheatstone-bruggen'*.
Het principe van zo'n brugschakeling is getekend in de onderstaande figuur. Vier weerstanden zijn in brug geschakeld. Eén diagonaal van de brug wordt gevoed met een gelijkspanning, over de andere diagonaal wordt een gevoelig meetinstrument M1 aangesloten. Als alle vier de weerstanden even groot zijn, dan is de brug in evenwicht en zal de meter geen spanning meten. De voedingsspanning wordt immers door de twee weerstandsdelers R1/R2 en R3/Rx door twee gedeeld en op beide knooppunten staat een spanning die precies gelijk is aan de helft van de voedingsspanning. Over het meetinstrument staat geen spanning.



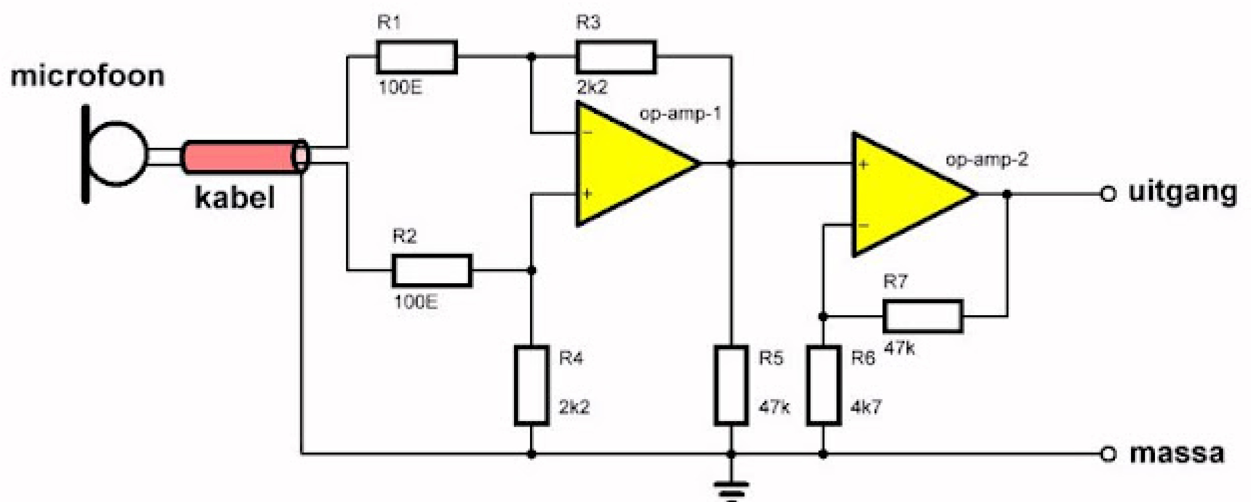
Het principe van de brug van Wheatstone. (© 2019 Jos Verstraten)

Vervangt u een van de vaste weerstanden, bijvoorbeeld Rx, door een sensorweerstand die een of andere fysische grootheid (licht, temperatuur, druk, etc.) omzet in een kleine weerstandsvariatie, dan zal de brug deze kleine weerstandsvariatie omzetten in een spanning over de meetdiagonaal van de brug. Door een tweede weerstand van de brug, in het getekende voorbeeld R3, uit te voeren als een potentiometer kunt u de brug ijken voor een bepaald nulpunt. Stel dat de brug wordt gevoed met een spanning van 10 V. In evenwicht staat er op beide aansluitingen van de meter een spanning van precies 5 V. Als de brug uit evenwicht komt doordat de weerstand van de sensor Rx iets toe- of afneemt, dan zal er op de ene aansluiting van de meter een spanning van bijvoorbeeld 5,05 V ontstaan en op de andere aansluiting een spanning van 5,00 V. Dit kleine spanningsverschil moet u versterken, maar bovendien moet de instelspanning van 5,00 V er uit verwijderd worden. Uiteraard is een verschilversterker daarvoor de aangewezen schakeling! In de onderstaande figuur is het standaard schema gegeven. De twee ingangen van de verschilversterker worden met één diagonaal van de Wheatstone-brug verbonden. Daarbij vervullen twee brugweerstanden de rol van serieweerstanden van de verschilversterker. De uitgangsspanning van de schakeling levert een naar de massa gerefereerde spanning af die recht evenredig is met het weerstandsverschil α dat door de sensorweerstand van de brug wordt opgewekt.



Een verschilversterker in een Wheatstone schakeling. (© 2019 Jos Verstraten)

De verschilversterker en common-mode onderdrukking
Signaal producerende onderdelen kunnen vaak last hebben van stoorsignalen, zoals brom of ruis. Dat verschijnsel wordt des te belangrijker naarmate de onderdelen minder signaal opwekken en een hogere eigen impedantie hebben. Om de signalen van dergelijke onderdelen te transporteren moet u afgeschermde kabels gebruiken. De afscherming, die aan de massa ligt, zal dan het grootste deel van de externe stoorsignalen opvangen en afvoeren naar de massa. Toch kunt u in de praktijk niet altijd gebruik maken van afgeschermde draden. Bij iedere afscherming is het immers de bedoeling dat een van de aansluitingen van het onderdeel aan de afscherming en dus aan de massa ligt.
Als voorbeeld bespreken wij een gevoelige gebalanceerde microfoon. Een dergelijk onderdeel produceert een zeer lage spanning over een hoge impedantie. Door de speciale gebalanceerde opbouw van het onderdeel is het onmogelijk een van de aansluitingen aan de massa te leggen. Op de twee hoog-impedante aansluitingen staan niet alleen signaalspanningen (ten opzichte van elkaar in tegenfase) maar ook stoorsignalen zoals brom van het wisselspanningsnet. Die brom is echter wel op beide aansluitingen in even grote mate aanwezig.
Een dergelijke situatie, waarbij twee signaalvoerende leidingen in even sterke mate verontreinigd zijn met een stoorsignaal, noemt men een *'common-mode situatie'*. Een verschilversterker is een ideale schakeling om dergelijke common-mode spanningen te scheiden van de eigenlijke signaalspanning. Dat volgt uit de basiseigenschap van een dergelijke schakeling. De versterker berekent immers het verschil tussen de spanningen op de twee ingangen.
Als er aan beide ingangen identieke spanningen worden gelegd, dan zal de uitgang van de schakeling op 0 V blijven staan. Er is dan immers geen sprake van een verschilspanning tussen de ingangen.
Een praktische toepassing van deze common-mode onderdrukking is getekend in de onderstaande figuur. De microfoon wordt via een twee-aderige afgeschermde kabel met de verschilversterker IC1 verbonden. Let op dat de afscherming van deze kabel wel aan de massa van de schakeling ligt, maar dat de twee microfoonaansluitingen zweven ten opzichte van de massa.

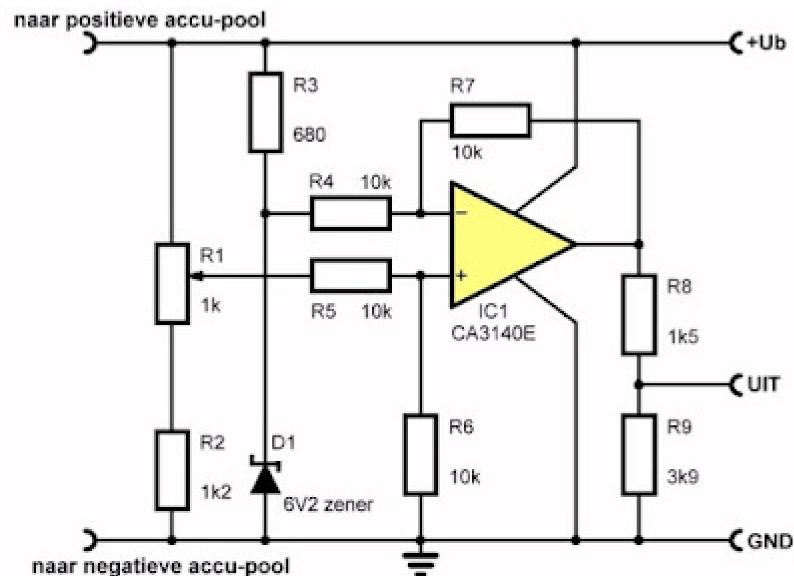


Een verschilversterker onderdrukt common-mode spanning op de aansluitingen van een microfoon. (© 2019 Jos Verstraten)

De verschilversterker berekent het verschil tussen zijn beide ingangsspanningen. Iedere ingang voert twee signalen. Op de eerste plaats het microfoonsignaal, maar dat is op de tweede ader 180° in fase gedraaid, dus omgekeerd. Deze twee signaalspanningen introduceren dus een spanningsverschil tussen de beide ingangen van de versterker en de schakeling zal dit spanningsverschil op de uitgang zetten. Daarnaast staat er op de beide aders van de microfoon het common-mode signaal, dat echter op beide aders even groot en in fase is. Deze signalen introduceren geen spanningsverschil tussen de beide ingangen van de verschilversterker en u zult er op de uitgang van de schakeling dan ook niets van terug vinden. De uitgang levert een signaal af ten opzichte van de massa, dat alleen een verband

heeft met het door de microfoon gegenereerde signaal. Dit kleine verschilsignaal wordt in een tweede trap, een operationele versterker als niet-inverterende versterker geschakeld, verder versterkt.

Meten met onderdrukt nulpunt
Het onderstaande is niet van toepassing als u verslaafd bent aan digitale meters. Als u echter nog af en toe een ouderwetse analoge meter wilt toepassen is hetgeen volgt misschien wel heel nuttig. Stel dat u de spanning over een 12 V accu wilt meten met een analoge voltmeter met een bereik tot 15 V. Het bereik van 0 V tot 10 V, dus ⅔ van de schaal, is in feite niet interessant. De spanning over een accu zal immers nooit lager worden dan 10 V. Het zou mooi zijn als u het nuttige meetbereik van 10 V tot 15 V over de volle schaal van de analoge meter kunt uitspreiden. Daar komt de verschilversterker u ter hulp, kijk maar naar de onderstaande figuur.



Het onderdrukken van het nulpunt bij het meten van een 12 V accuspanning.
(© 2019 Jos Verstraten)

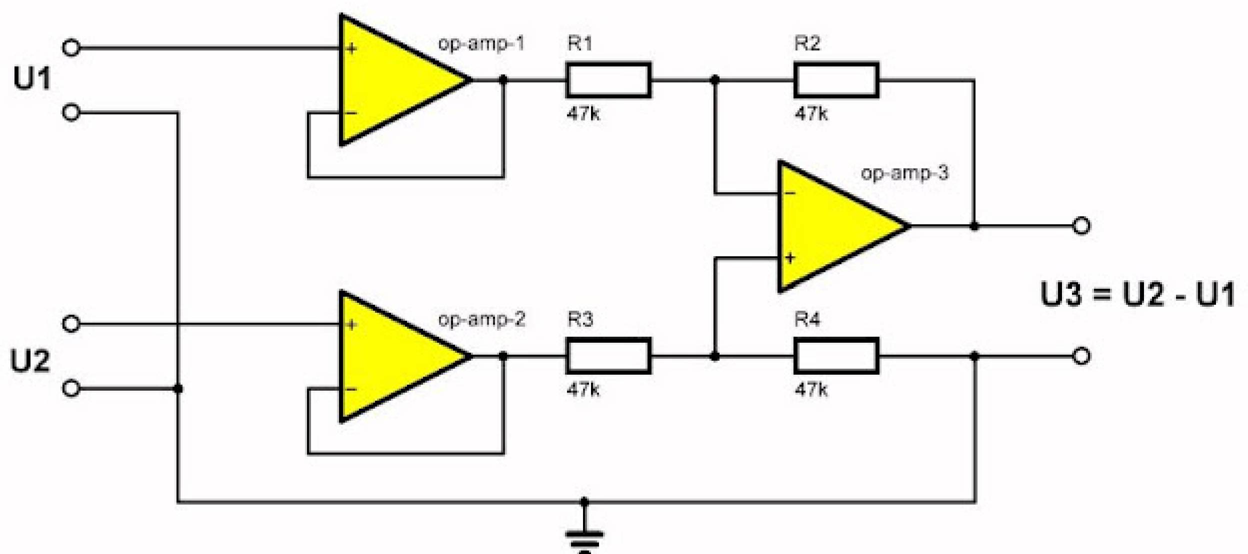
Het op te lossen probleem kan als volgt omschreven worden. Een accuspanning, die kan variëren tussen 10 V en 15 V, moet omgevormd worden in een spanning met een bereik tussen 0 V en 5 V. U kunt deze transformatie oplossen door eerst 10 V van de accuspanning af te trekken en nadien de overblijvende 0 V tot 5 V aan te bieden aan een analoge voltmeter met een bereik tot 5 V.
Als operationele versterker wordt niet de bekende 741 gebruikt, maar de 3140. Het nadeel van de 741 is dat de uitgangsspanning niet lager kan komen dan ongeveer 4 V boven de negatieve voedingsspanning. Het zal duidelijk zijn dat u de schakeling wilt voeden uit de accuspanning. De negatieve voedingsspanning voor de op-amp is dan uiteraard gelijk aan 0 V. Bij een 741 zou de uitgangsspanning niet lager kunnen komen dan +4 V, waardoor de schakeling niet zou werken. De 3140 heeft echter een uitgangsspanningsbereik tot tegen de negatieve voedingsspanning. Als dit IC aan zijn negatieve voedingsaansluiting de massa voelt, is het toch nog in staat zijn uitgang tot ongeveer +0,2 V te laten dalen. Deze kleine restspanning moet u maar voor lief nemen!
De rest van de schakeling behoeft nauwelijks toelichting. De zenerdiode D1 levert een spanning van 6,2 V als aftrekspanning. Reden is dat dit soort zenerdioden zeer stabiele spanningen opwekt. Omdat de aftrekspanning lager is dan de nodige 10 V, zal het duidelijk zijn dat ook de ingangsspanning aan deze gewijzigde omstandigheid aangepast moet worden. Vandaar de spanningsdeler R1/R2, waarmee de accuspanning wordt aangepast aan de nieuwe waarde van de aftrekspanning. De verschilversterker is duidelijk herkenbaar. De identieke weerstanden R4, R5, R6 en R7 zorgen voor de wiskundige bewerking C = A - B. De uitgang van de verschilversterker gaat via een spanningsdeler R8/R9 naar de uitgang van de schakeling. De analoge spanningsmeter met een bereik tot 5 V kunt u aansluiten tussen de uitgang en de massa. De schaal van deze meter moet u wijzigen van 0 V tot 5 V naar 10 V tot

De instrumentatie-versterker

Inleiding
Het zal wel duidelijk zijn geworden dat een verschilversterker een machtig mooie schakeling is, waarmee u heel wat schakeltechnische problemen elegant kunt oplossen. Toch heeft de besproken schakeling een aantal gebreken.

- Op de eerste plaats worden de ingangen via weerstanden verbonden met de ingangsspanningen. Deze beide weerstanden moeten een specifieke waarde hebben, wil de schakeling echt als verschilversterker werken. Maar de uitgangsimpedantie van de bron zal grote invloed op de waarde van die weerstanden hebben. Bij een verschilversterker is dat verschijnsel dodelijk voor de werking! Zonder spanningsbuffers voor beide ingangen kunt u in de meeste gevallen niets met de basisschakeling beginnen.
- Een tweede probleem is dat, als de weerstanden in de schakeling groot worden, er problemen ontstaan met faseverschuivingen en parasitaire capaciteiten. Daardoor zal de schakeling boven een bepaalde frequentie niet meer echt als verschilversterker gaan werken.
- Een derde probleem is dat de ingangsimpedanties van beide ingangen niet aan elkaar gelijk zijn. Voor sommige schakelingen kan deze niet identieke impedantie problematisch zijn.

Al deze problemen kunnen opgelost worden door de twee ingangen van de verschilversterker aan te sluiten op spanningsvolgers. Het volledige schema, getekend in de onderstaande figuur, bevat dan drie operationele versterkers, waarvan de twee linker als buffer zijn geschakeld en de rechter als verschilversterker.

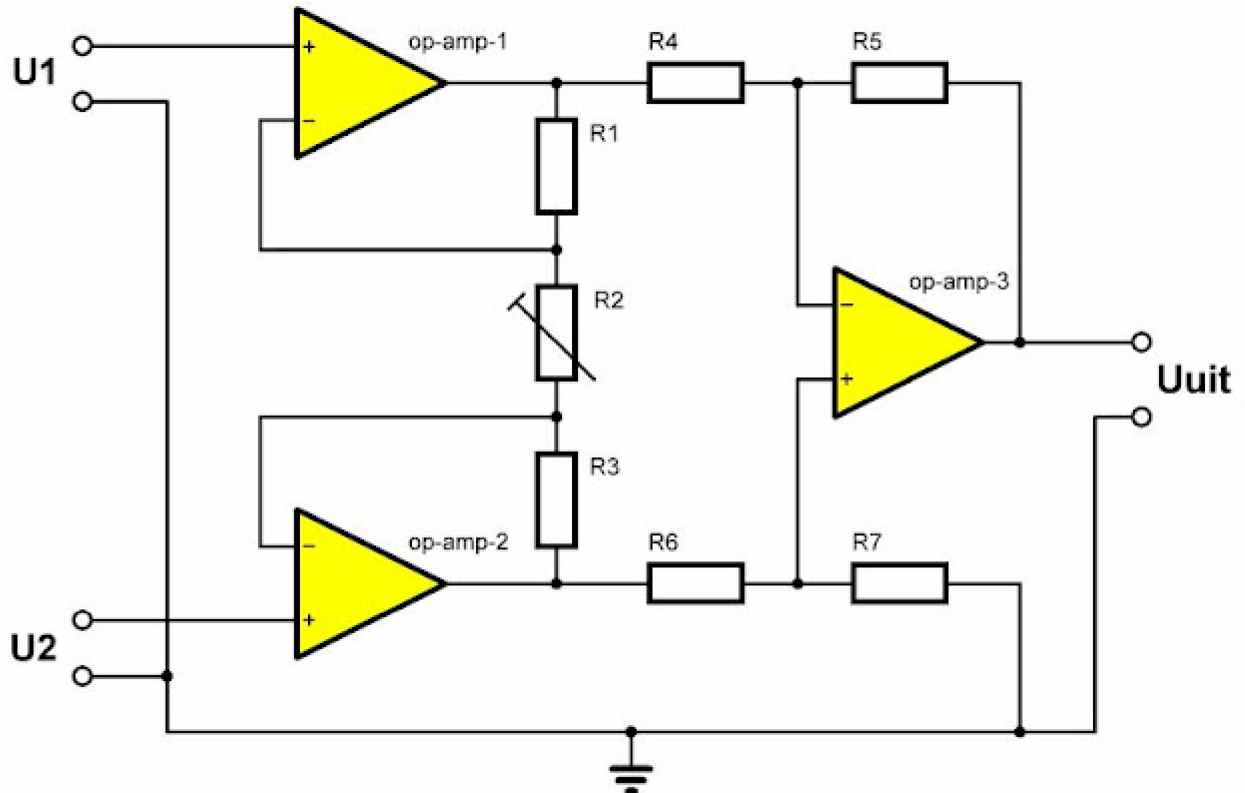


Een verbeterde versie van het basisschema vereist drie op-amp's. (© 2019 Jos Verstraten)

De instrumentatie-versterker
Men is er in geslaagd een schakeling te ontwerpen die ook gebruik maakt van drie operationele versterkers en die precies hetzelfde werkt als een verschilversterker, maar veel betere specificaties heeft. Dat is de instrumentatie-versterker, die in deze laatste paragraaf in het kort wordt besproken. In het kort, omdat deze schakeling in doe-het-zelf kringen nauwelijks wordt gebruikt.

Het basisschema van een instrumentatie-versterker
Het basisschema van een instrumentatie-versterker is getekend in de onderstaande figuur.

De twee linkse operationele versterkers lijken als spanningsvolgers te werken, maar dat is niet het geval! Tussen de twee inverterende ingangen is immers een weerstand R2 opgenomen en dit onderdeel speelt een belangrijke rol bij de werking. Deze weerstand staat in serie met twee andere, even grote weerstanden R1 en R3 die naar de uitgangen van de operationele versterkers gaan.
De twee uitgangen van de linker op-amp's zijn verbonden met een derde op-amp die als klassieke verschilversterker is geschakeld. De vier weerstanden R4, R5, R6 en R7 van deze schakeling zijn identiek.



Het basisschema van een instrumentatie-versterker. (© 2019 Jos Verstraten)

De werking van de instrumentatie-versterker
De werking van een instrumentatie-versterker is zonder gebruik te maken van wiskunde tamelijk moeilijk te doorgronden. Fysisch kan in feite alleen een benaderende verklaring van de werking worden gegeven.
De twee linkse operationele versterkers zullen er naar streven het spanningsverschil tussen beide ingangen nul te maken. Vandaar dat de twee ingangssignalen U_1 en U_2, die worden aangeboden aan de niet-inverterende ingangen, ook worden teruggevonden op de inverterende ingangen. Deze spanningen staan echter over de weerstand R2. Het gevolg is dat over deze weerstand een spanning staat die recht evenredig is met het verschil tussen beide ingangsspanningen. Hoe groter dit verschil, hoe groter de spanning over deze weerstand. Deze spanning kan alleen maar over deze weerstand staan als er door de weerstand een stroom vloeit. Deze stroom moet ergens vandaan komen en het zal duidelijk zijn dat deze alleen vanuit de twee uitgangen van de linker op-amp's via de weerstanden R1 en R3 naar weerstand R2 kan vloeien. Hoe groter de verschilspanning op de ingangen, hoe groter deze stroom zal zijn.
Het zal duidelijk zijn dat het heel eenvoudig is deze schakeling te laten versterken. Het volstaat immers de weerstand R2 te verlagen om een grotere stroom door de weerstand tot gevolg te hebben en dus ook grotere uitgangsspanningen. Dat is het grote voordeel van de instrumentatie-versterker! Door middel van één potentiometer kunt u de versterking van de schakeling over een groot bereik instellen.
Tweede groot voordeel is dat nu alleen de weerstanden R1 en R3 zo nauwkeurig mogelijk aan elkaar moeten zijn.
De ingangstrap rond op-amp-1 en op-amp-2 versterkt dus wel spanningsverschillen tussen beide ingangen, maar zal common-mode signalen onverzwakt doorkoppelen. Als bijvoorbeeld

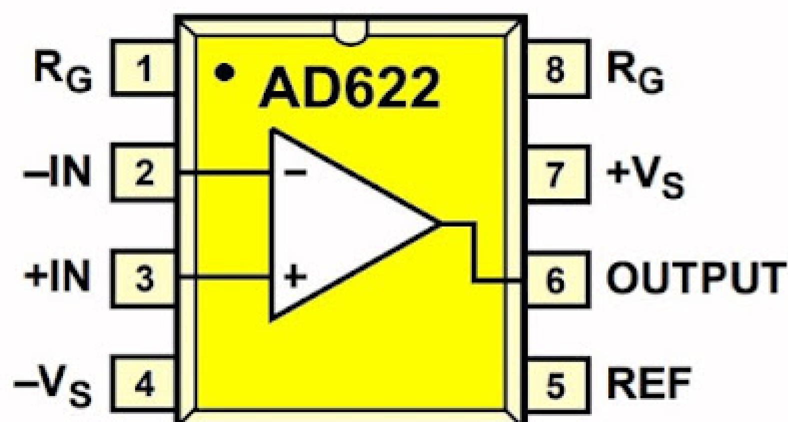
beide ingangen op een spanning van +5 V staan, dan staan ook beide aansluitingen van de weerstand R2 op deze spanning. Er vloeit geen stroom door dit onderdeel, met als gevolg dat ook de uitgangen van op-amp-1 en op-amp-2 op +5 V staan. De linker trap van de instrumentatie-versterker zal dus common-mode signalen onversterkt doorkoppelen naar zijn uitgangen, maar verschilsignalen met een door de waarde van R2 bepaalde versterkingsfactor versterken. Om nu deze onversterkte common-mode signalen uit het signaal te filteren wordt de rechter, traditioneel opgebouwde verschilversterker gebruikt. Het volstaat nu echter dat deze schakeling wordt ingesteld op een versterking van 1.
De common-mode spanning wordt op de bekende manier uit het signaal gefilterd, de reeds versterkte verschilspanning wordt omgezet in een even grote spanning ten opzichte van de massa.

Voordelen van de instrumentatie-versterker
Ten opzichte van de verschilversterker heeft de instrumentatie-versterker de volgende voordelen:

- De werking van de traditionele verschilversterker, namelijk common-mode signalen uitfilteren en verschilsignalen versterken, wordt nu opgesplitst in twee trappen die ieder maximaal voor hun taak berekend worden.
- Het linker gedeelte van de schakeling dat het verschilsignaal versterkt, heeft maar twee weerstanden nodig die precies even groot moeten zijn.
- Het rechter gedeelte van de schakeling dat de common-mode signalen moet uitfilteren kan volstaan met een versterkingsfactor van 1 en wordt aangestuurd uit twee zeer laag-ohmige op-amp uitgangen.
- De versterking van de verschilspanning is heel eenvoudig in te stellen door middel van één potentiometer.
- De onderdrukking van common-mode signalen is volledig onafhankelijk van de versterking van de schakeling, dit proces gebeurt immers in de tweede trap.

Besluit
Een instrumentatie-versterker is een ideale schakeling voor het versterken van zeer kleine verschilsignalen, die in een omgeving worden opgewekt waar de signalen gestoord worden door zeer grote common-mode signalen. Een omgeving die u in de industrie vaak aantreft! Het zal dan ook geen verbazing wekken dat de instrumentatie-versterker op grote schaal in industriële omgevingen wordt toegepast voor het versterken van allerlei zeer kleine signalen die door sensoren worden geleverd.

Low-cost geïntegreerde instrumentatie-versterker
De opzet van een instrumentatie-versterker leent zich uitstekend voor integratie. Er zijn dan ook ontelbare geïntegreerde instrumentatie-versterkers op de markt verschenen. Een handige chip is de AD622, die nog geen tientje kost, in een DIL-8 behuizing zit en waarop u maar één externe weerstand moet aansluiten.



Behuizing en aansluitgegevens van de AD622. (© Analog Devices)

Tussen de pennen 1 en 8 sluit u die ene weerstand Rg aan, die de totale versterking van de schakeling definieert tussen 2 en 1.000. De versterkingsfactor wordt gegeven door de formule:
A = 1 + [50.500 / Rg]
Pen 5, REF, gaat naar de massa van uw schakeling. De AD622 moet symmetrisch worden gevoed.
De voornaamste specificaties van de AD622:

- **Voedingsspanningen:** ±18 V max.
- **Voedingsstroom:** 1,3 mA max.
- **Ingangsweerstanden:** 10 GΩ typisch
- **Ingangscapaciteiten:** 2 pF typisch
- **Ingangsoffset:** 125 µV max.
- **Uitgangsspanning:** voedingsspanningen ±1,2 V
- **3 dB bandbreedte bij A = 1:** 1 MHz
- **3 dB bandbreedte bij A = 10:** 800 kHz
- **3 dB bandbreedte bij A = 100:** 120 kHz
- **3 dB bandbreedte bij A = 1.000:** 12 kHz
- **Slewrate:** 1,2 V/µs